宇宙用制御技術を応用した Anti Rolling Gyro 375T(ヨット用減揺装置)の開発

Development of the Anti Rolling Gyro 375T (Rolling Stabilizer for Luxury Yachts) that applies Control Technology for Space

竹内 洋志[*1] Hiroshi Takeuchi
梅村 克哉[*2] Katsuya Umemura
前田 貞弘[*1] Sadahiro Maeda

Anti Rolling Gyro(以下，ARG と略す)は，ジャイロトルクを利用した船舶の横揺れを低減する装置で，停船時の横揺れを抑えることができる．現在までに，2機種を開発し販売を行ってきた．今回新たに，従来型の 1.5 倍の能力を有した ARG375T(*)を開発した．開発においては，性能・強度を確認するベンチ試験以外に，国内／欧州においてフィールド評価を実施し，減揺効果，取扱い性，安全性を確認した．これらの開発を完了し販売を開始したので，これを紹介する．

(*) ARG375T の“375”は，出力トルク値(375×100Nm)を意味し，“T”は，Torque の頭文字を示す．

1. はじめに

ARG とは，ジャイロ原理を利用した船舶の横揺れ減揺装置である．ARG は弊社の宇宙用制御技術の一つであるコントロール・モーメント・ジャイロ(Control Moment Gyro)技術を船舶用に応用開発したもので，船舶の横揺れを低減し，乗り心地を向上させる機器である．ARG の大きな特徴は，航走時の揚力を利用したフィンスタビライザには不可能な停船時の減揺ができることである．またジャイロトルクを利用しているため船舶のどこに搭載しても効果があり，既存船への取付けも可能である．

平成2年よりジャイロ技術応用製品として，スキー場のゴンドラキャビンの減揺や吊り荷揺れ止めなどへの適用[(1)]を検討していたが，その後国内への小型ボート，業務艇用減揺装置の開発／販売を開始した．平成 16 年からは，イタリアのヨットメーカと売買独占契約を締結し，欧州向け輸出を主流とし，国内・米国・アジア向けを含め製造販売しており，一時金融危機時には販売が落ち込んだが，ボート業界の回復とともに復帰し現在に至る．

弊社の主顧客であるイタリアのヨットメーカは他社ヨットとの差別化のために三菱ブランドの減揺装置“ARG”を搭載することによりヨットの販売を拡大させ，一方弊社では ARG をヨットへ標準搭載販売することで，お互いに win-win の関係を築いてきた．

ARG375T は，“従来機種を各々1台ずつ計2台搭載する船舶に対し，新型モデル1台に置き換えたい”というヨットメーカの強いニーズにこたえて開発を開始したもので，ARG の横幅は搭載ヨットのキール幅に合わせ，質量も従来型搭載より軽く設計した．また安全設計に特に配慮し，安全装置の新規適用，開発試験での故障モードを想定した破壊試験を行ってきた．さらにマーケットから見ると，従来の 1.5 倍の能力をもつ大型の ARG シリーズが登場することにより，従来搭載できなかった排水量 250ton クラス程度までの大きな船舶への ARG 適用範囲を広げた．

*1 航空宇宙事業本部誘導・エンジン事業部エンジン・機器技術部
*2 航空宇宙事業本部誘導・エンジン事業部エンジン・機器技術部主席技師

2. ARG の概要・特徴

ARG は，高速回転するフライホイール（コマ）をジンバルで支持し，そのジンバルを揺動させる（回転角速度を加える）ことにより，フライホイールには回転角速度と直交する方向にジャイロトルクが発生する．

ARGの出力であるジャイロトルクT_{ARG}は，ARGの角運動量;Hとジンバル角速度;$\dot{\Theta}$の外積であらわされる．そのジャイロトルクを船舶の横揺れに対して，カウンタ方向に働かせることで，横揺れを低減させる公知の原理を利用している．作動原理を図1に示す．

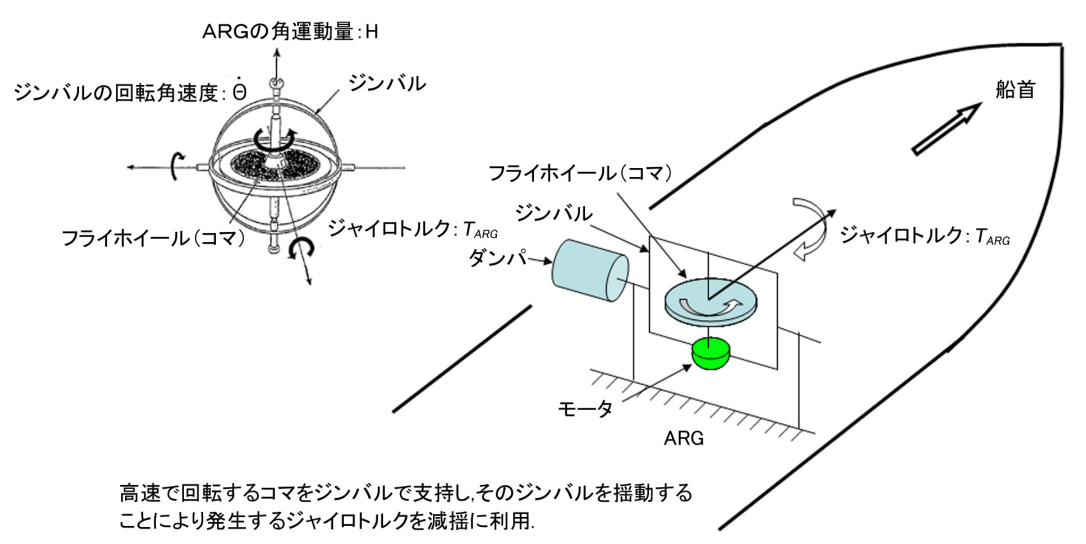


図1　ARG の作動原理

ARG は，図2に示す機能ブロック図において，ジャイロ効果作用で船舶の横揺れ角速度を検知しジンバル回転角速度をエネルギー吸収装置（ダンパ）で制御する受動型を採用している．このため，船体の姿勢制御を積極的に検知するセンサ及びジンバルコントローラが不要となるため，システムや構造がシンプルで，信頼性／安全性が高いという特徴を有している．

また ARG はモータ／ベアリングの冷却に空冷を採用しているため，水冷などで必要な冷却用付属装置が不要で配管などを設置する必要がなく，メンテナンス性も良い．ARG の搭載例を図3に示す．

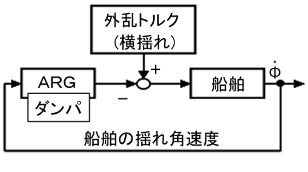
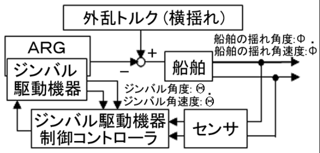
項目	受動（パッシブ）型	能動（アクティブ）型
機能ブロック図		
性能	減衰増強型	減衰，剛性を変化させることができ，幅広い周波数に対応
システム	コントローラが必要なく，シンプル	センサ，コントローラが必要であり，複雑
安全性	コントローラはなく，船舶の横揺れを増幅させることはない．	コントローラが故障した場合，船舶の揺れを増幅させる可能性あり．

図2　ARG の機能ブロック図

図3　ARG の搭載例

次に，ARG のシステム構成を図4に示す．ARG システムは，電源・モータドライバ・ARG の3つから構成される．電源は，船体の発電機を使用し，ブレーカスイッチを介してモータドライバに電力を供給し ARG 内部のフライホイールを駆動する．モータドライバにはインバータを用いた ARG 専用機器を採用している．

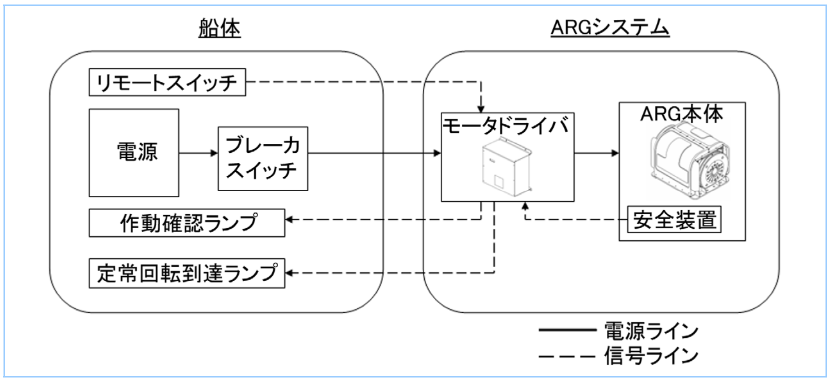


図4　ARG のシステム構成

ARG を操舵室などの外部から始動／停止できるようにリモートスイッチを接続し操作することができる．また ARG 作動時に点灯する“作動確認ランプ”，定常回転に到達したことを知らせる“定常回転到達ランプ”を接続し，ARG の運用状況の確認を可能とした．モータドライバには，様々な保護機能が設定されており，異常時に ARG を停止させる設定がされている．今回新たに，本装置にあるダンパに設置した温度センサによって，温度が規定温度範囲を超えた場合に，ARG を停止させる安全装置を追加した．（詳細を3項に示す．）

ARG の製品一覧を表1に示す．冒頭で述べたように，名称にある数字（125，250，375）は ARG が出力するトルク（フライホイールの角運動量とジンバル回転角速度の積）を示しており，ARG375T の場合，最大で 37500Nm のトルクを出力する．名称にトルク値を用いたのは，ARG はジンバル回転角度を±90deg と大きく設定し，保有角運動量に対して出力ジャイロトルクが大きいという特徴を表現するために採用した．

表1　ARG の製品一覧

ANTI ROLLING GYRO

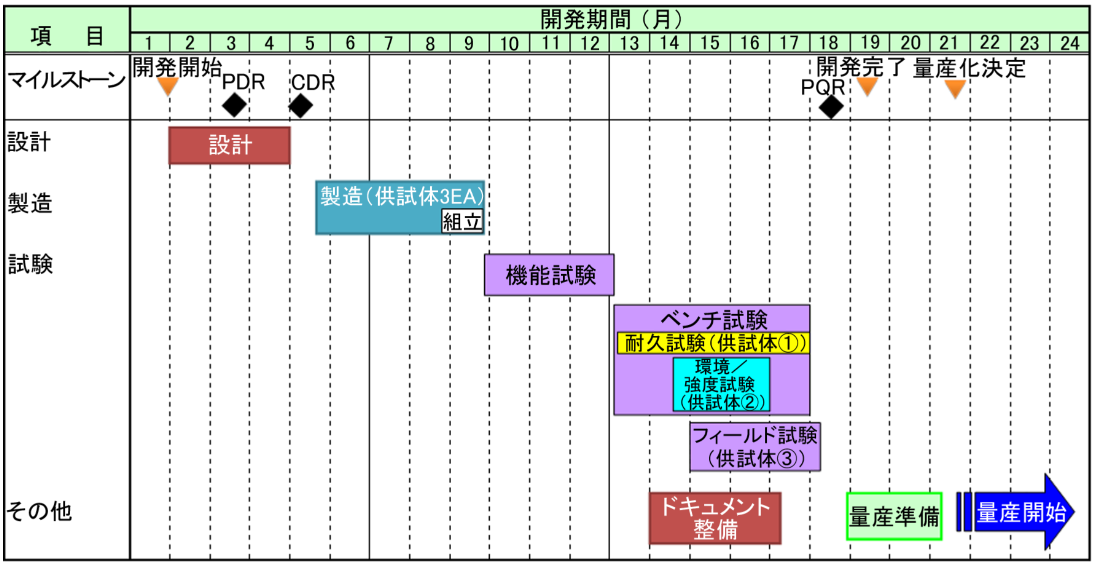
名　称	ARG125T	ARG250T	ARG375T
型　式	MSM-12500T-A1	MSM-25000T-A1	MSM-37500T-A1
外　観			
角運動量	2500 Nms	5000 Nms	7500 Nms
出力トルク	12500 Nm	25000 Nm	37500 Nm
寸　法 (W×H×L)	930 mm × 590 mm × 570 mm	1000 mm × 700 mm × 720 mm	1120 mm × 780 mm × 830 mm
消 費 電 力 (最大 / 定常)	単相 : 3.8 kW / 3.4 kW 三相 : 3.4 kW / 3.0 kW	単相 : 4.8 kW / 3.5 kW 三相 : 4.3 kW / 3.0 kW	単相 : 5.5 kW / 4.5 kW 三相 : 5.2 kW / 4.3 kW
質　量	300 kg	700 kg	910 kg
船　舶			
船 舶 諸 元	全　長 : 14.15m 全　幅 : 4.34m 排水トン : 18.2t	全　長 : 20.63m 全　幅 : 5.63m 排水トン : 45.0t	全　長 : 22.50m 全　幅 : 5.50m 排水トン : 56.9t

（注）ヨット写真は Ferretti 社提供

3. ARG375T の開発

ARG375T は，供試体を3台製作し，各種試験を並行して行うことで，表2に示すように，設計開始から開発試験の完了まで，1.5 年で開発を完了させ，量産化に移行させることができた．ベンチ試験は，5ヶ月をかけて，強度，環境（温度），耐久性の評価を，フィールド試験では，3ヶ月間，実際の船舶に搭載し，減揺性能，取扱い性，安全性などの評価を実施した．

表2 ARG375T 開発試験日程



PDR：Preliminary Design Review
CDR：Critical Design Review
PQR：Post Qualification Review

ARG375T の開発において実施した試験の詳細を表3に示す．機能試験の1つであるジンバルの揺動試験結果を図5に示す．本試験は，ARG を載せた治具架台を正弦波で揺動させたときに発生するジンバルの回転角速度を計測することにより，ARG 出力トルクを評価するものである．本図に示すように，計測結果はシミュレーションと合致しており，ARG が所定のトルクを出力していることを確認した．

表3 ARG375T 開発試験の内容

試験項目	試験内容
機能試験	ARG の起動，停止，定常作動特性などの基本特性を確認
強度/破壊試験	想定される最大荷重に対する ARG の強度を確認 想定を超える荷重を印加し，ARG の強度を確認
環境試験	想定される高温雰囲気条件で，ARG の基本特性を確認
耐久試験	長期間の連続運転による ARG の耐久性を確認
フィールド試験	実際の船舶に搭載し，ARG の減揺性能，取扱い性，安全性を確認

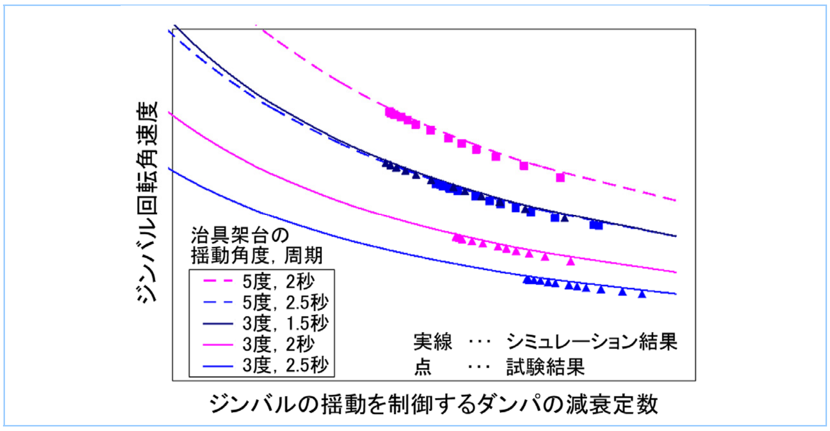


図5 ジンバルの揺動試験 計測結果

ARG は高速回転するフライホイールを有しており，万一破損した場合は大きな事故につながる可能性があるため，PL（Product Liability）対策として，故障モードを想定した破壊試験を実施した．試験はジンバルの回転角速度を制御する2個のダンパの制動力が共に低下したモードを想定して行われた．その結果，ジンバルは制限を超える角速度で揺動を繰り返したが，フライホイールなどの主要構造体には異常がなく，致命的な破壊には至らないことを確認した．試験の様子を図6に示す．

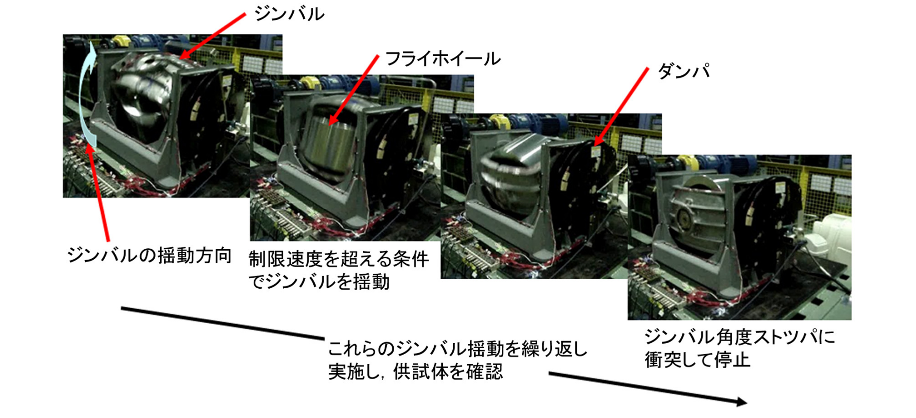


図6　破壊試験の様子

また今回，新たに追加した前述の安全装置は，ユーザが ARG を過負荷で使用した場合（波浪海域での使用）やジンバルの回転角速度を制御するダンパが故障した場合，ARG が搭載されている室内の温度上昇によって，装置の温度が規定以上に上昇した場合に ARG への電源供給を遮断する機能を有している．この安全装置の適用により，ARG の安全性をさらに高めることができた．この安全装置は，現在生産している機種にも適用を開始した．

また本開発においては，MIL-STD-882 及び BS8800(2004)に基づいたリスクアセスメントを行うことにより，ARG の危険源を特定し，装置の設計に反映するとともに，取扱説明書や警告ラベルへの反映も実施した．反映事例として，モータドライバの内部に保護装置を追加することにより，誤配線などで安易に故障しないような構造にしたことが挙げられる．

さらに，ARG の開発に重要な要素の1つとして，化学物質管理の欧州 Reach（Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals）規則に適合する必要がある．このため，従来機種の生産から築き上げたサプライチェーンを活用し，パートナーの協力を得て，部品の化学物質情報を管理し，部品選定に反映及び適合性の確認を実施中である．

4. 減揺効果の実艇評価

ARG375T の減揺効果を評価した船舶／メガヨットの諸元を表4に示す．本船舶／メガヨットには ARG375T を1台／4台搭載して減揺評価を実施した．国内船舶では，波高の異なる状況下で3回にわたり，ARG 作動時と ARG 非作動時の横揺れ角度を計測した．本試験における1回目の計測結果を図7に示す．停泊時に約70%の減揺率があることを確認した．

表4　減揺効果評価船の諸元

項目	国内船　諸元	欧州メガヨット　諸元
全　長	17.2 m	約 31.5 m
全　幅	約 3.9 m	約 6.7 m
排水量	22.0 t	約 177 t
メタセンタ高さ	約 1.3 m	約 1.6 m
固有周期	約 2.5 秒	約 4.8 秒
ARG 搭載台数	ARG375T : 1台	ARG375T : 4台

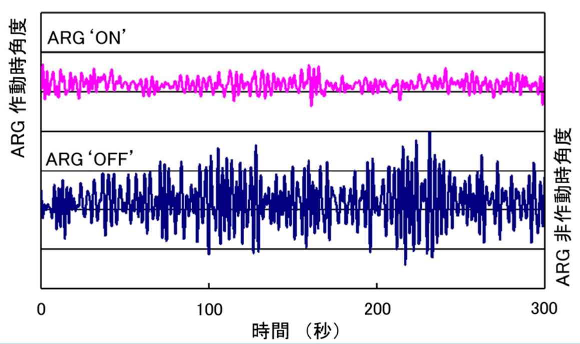


図7　ARG の減揺効果計測結果

次に，ARG375T を4台搭載した欧州メガヨットにおいて，減揺効果の評価を実施した結果を図8に示す．本ヨットにおいても，良好な減揺効果を確認しユーザからの評価を得た．また図9に示すように，船舶の排水量，メタセンタ高さ，横揺れ固有周期の諸元を用いたシミュレーションによる減揺率予測結果と，実船での減揺計測結果の比較がよく合致することを確認した．

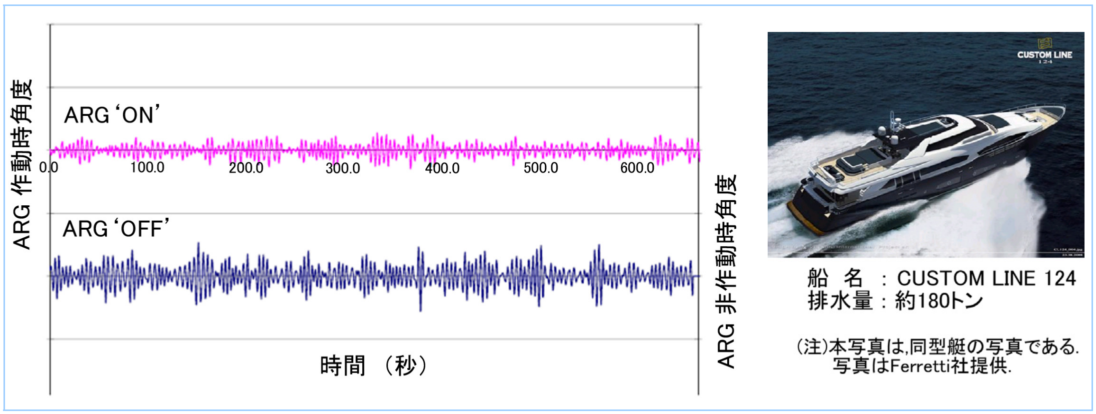


図8　欧州での減揺効果計測結果

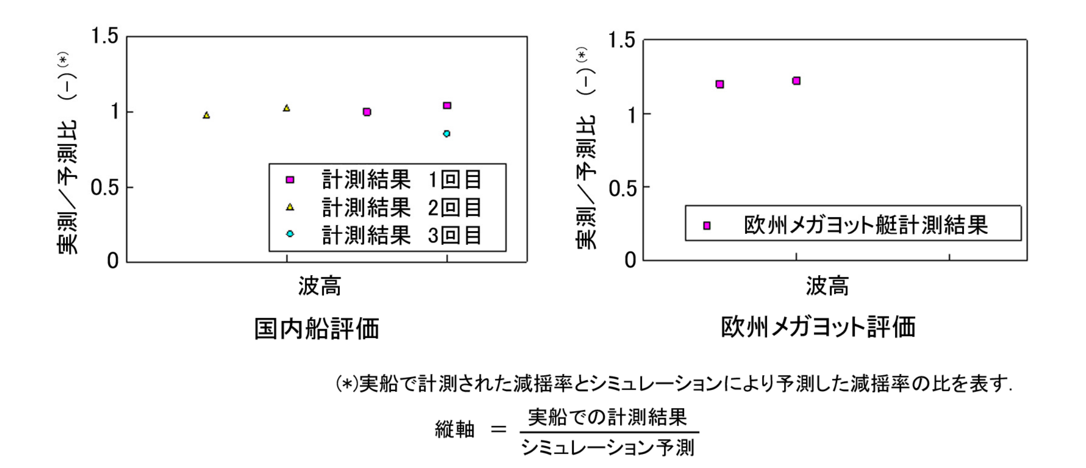


図9　シミュレーションと実船での計測結果の比較

5. まとめ

ARG はヨットの停船時減揺要望やマリンレジャーやフィッシングボートでの船酔い防止や乗り心地改善に利用されている．また，作業船，測量船，及び取締船などにおいても使用され，停泊時のデッキ作業や接岸作業時の作業性向上や船舶の操作性向上，疲労感の減少などにも寄与している．

ARG と同様のジャイロ型減揺装置やゼロスピード・フィンスタビライザの減揺装置のコンペチタが出現してきており，また今後も様々な全世界のユーザの横揺れを抑えるニーズにこたえるため，現行 ARG の更なる性能向上／改良，またシリーズ増強，及びブラジル，アジアなどの営業活動に取り組む所存である．

参考文献

(1)　星尾光紀ほか，コントロール・モーメント・ジャイロを用いた減揺装置，三菱重工技報，Vol. 31 No. 3(1994) p. 213～216